

Adaptation de cas spatiaux et temporels

Valmi Dufour-Lussier^{1,2,3}

Florence Le Ber^{4,1,2}
Laura Martin⁵

Jean Lieber^{1,2,3}

¹ Université de Lorraine, LORIA, UMR 7503 — 54506 Vandœuvre-lès-Nancy

² CNRS — 54506 Vandœuvre-lès-Nancy

³ Inria — 54602 Villers-lès-Nancy

⁴ Université de Strasbourg/ENGEEES, LHYGES, UMR 7517 — 67000 Strasbourg

⁵ INRA, UR055 ASTER–Mirecourt — 88500 Mirecourt

valmi.dufour@loria.fr, florence.leber@engees.unistra.fr,
jean.lieber@loria.fr, laura.martin@mirecourt.inra.fr

Résumé

Les algèbres qualitatives forment une famille de langages utilisés principalement pour représenter des connaissances de nature temporelle ou spatiale. Cet article propose une approche pour adapter des cas représentés dans une telle algèbre. Un exemple spatial portant sur l’agronomie ainsi qu’un exemple temporel portant sur la cuisine sont donnés. L’idée sous-jacente à cette approche de l’adaptation est d’appliquer une substitution puis de réparer les incohérences qui pourraient être apparues, grâce à la révision des croyances appliquée aux algèbres qualitatives.

1 Introduction

Le raisonnement qualitatif spatial et temporel (RQST) est un domaine de recherche actif depuis les années 1980. Ce paradigme a été exploité dans le cadre de la résolution de contraintes et de la planification, mais plus rarement dans le cadre du raisonnement à partir de cas (RÀPC). Pourtant de nombreux problèmes où le RQST s’applique relèvent du RÀPC, car les connaissances visées sont souvent contextuelles et mal formalisées. C’est le cas dans le domaine de l’agronomie des territoires, où la connaissance est constituée à partir d’enquêtes en exploitation et de descriptions schématiques de l’organisation spatiale des territoires de ces exploitations (voir [24]). C’est le cas aussi dans le domaine culinaire, qui fait l’objet depuis quelques années d’un concours spécifique de la conférence ICCBR, et où interviennent des connaissances de nature temporelle.

Cet article propose une approche pour l’adaptation de cas spatiaux ou temporels. L’approche est fondée sur une procédure intégrant une adaptation par substitution et par révision. Par exemple, il peut être nécessaire de remplacer, dans une exploitation, une parcelle de maïs par une parcelle d’une autre culture, ou, dans une recette donnée, des champignons par des carottes. Une simple substitution est alors insuffisante, car toutes les cultures, ou tous les ingrédients d’une recette, ne se comportent pas de la même façon. C’est pourquoi nous ajoutons à la substitution une procédure de révision de croyance qui permet de modifier les contraintes spatiales de l’exploitation ou les contraintes temporelles de la recette pour les rendre cohérentes avec la connaissance du domaine.

Le plan de l’article est le suivant. La section 2 justifie notre approche en présentant deux exemples des domaines agricole et culinaire. La section 3 introduit ensuite les notions formelles nécessaires à la description de notre approche, à savoir l’adaptation par révision et le RSTQ. L’approche est ensuite décrite en détail dans la section 4 et un algorithme est présenté en section 5. La section 6 illustre ces notions formelles et les résultats de l’algorithme à partir des deux exemples de la section 2. Nous situons notre approche par rapport à d’autres travaux en section 7 avant de conclure et de présenter les perspectives de ce travail dans la section 8.

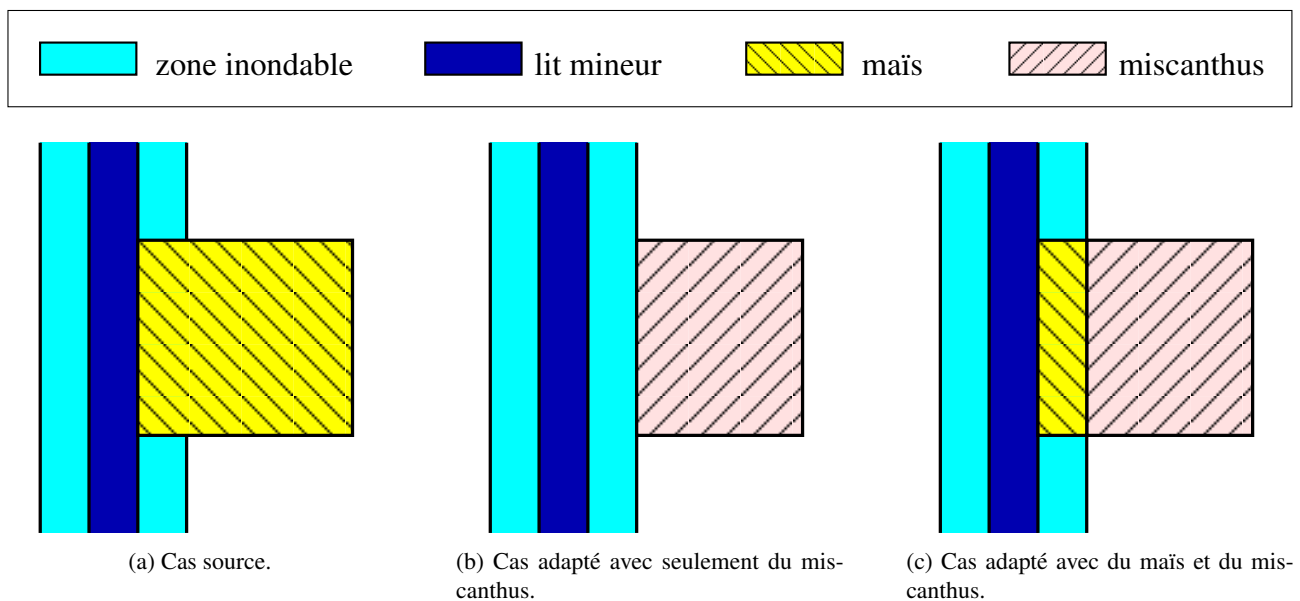


FIGURE 1: Exemple d'allocation spatiale de cultures.

2 Présentation des exemples

Cette partie décrit deux exemples pour lesquels une simple substitution ne donnerait pas une adaptation acceptable du cas remémoré vis-à-vis du problème cible. Dans le premier exemple, l'adaptation spatiale d'un cas agricole doit prendre en compte des connaissances agronomiques sur la localisation de cultures, telles que des règles environnementales ou des contraintes culturelles. Dans le deuxième exemple, l'adaptation temporelle d'une recette de *risotto* doit tenir compte de connaissances culinaires sur la durée de cuisson de différents légumes.

2.1 Un exemple agronomique et spatial

L'adaptation spatiale est illustrée par un exemple tiré du domaine agronomique, sur l'allocation de miscanthus, une plante pérenne, actuellement promue en Europe comme une source d'énergie renouvelable permettant d'obtenir un haut rendement de biomasse avec peu d'intrants [3]. Sa capacité à réduire les émissions de gaz à effet de serre est liée à sa localisation spatiale dans les territoires agricoles [10] et il est donc très intéressant de modéliser les changements d'usage de l'espace liés à son introduction dans ces territoires.

Le RàPC peut être utilisé pour modéliser l'allocation spatiale du miscanthus. Un problème est constitué d'une quantité de miscanthus à produire et de la description d'une exploitation agricole ; la solution est constituée de la localisation spatiale de la culture. La description de l'exploitation comporte l'assolement (la liste des cultures pratiquées et leur localisation) et les caractéristiques spatiales du territoire de l'exploitation (par exemple, les relations spatiales entre les champs et des zones bâties, des bois ou des rivières).

Dans l'exemple illustré par la figure 1, on considère un agriculteur voulant produire du miscanthus. Le cas d'une exploitation produisant du maïs est remémoré, à partir d'un ensemble de cas obtenus par des enquêtes menées en France [21] et en accord avec des connaissances expertes assimilant les besoins du miscanthus et du maïs vis-à-vis de la température et de l'humidité du sol.

Si on remplace le maïs par du miscanthus (qui est habituellement récolté de février à mars en France), on se trouve confronté à des contraintes agronomiques. En effet, l'accès des machines à la parcelle peut être rendu impossible en hiver à cause de l'excès d'eau dans les sols. Le miscanthus ne doit donc pas être implanté dans une zone inondable, alors que le maïs, lui, peut être implanté légalement jusqu'à 5 mètres du lit d'une rivière.

Ainsi, le processus d'adaptation doit non seulement remplacer le maïs par le miscanthus, mais aussi réduire la taille de la parcelle de miscanthus de sorte qu'elle soit disjointe de la zone inondable de toute rivière voisine.

Une adaptation parfaite devrait couper la parcelle originelle en deux, la partie proche de la rivière restant plantée en maïs, de sorte d’être toujours productive.

2.2 Un exemple culinaire et temporel

L’adaptation temporelle est illustrée par l’adaptation d’une recette de cuisine, dans l’esprit du projet TAAABLE [4], une application culinaire du RàPC. Si un utilisateur interroge le système TAAABLE pour obtenir une recette de *risotto* aux carottes et que cette recette n’existe pas dans la base, TAAABLE proposera d’adapter une recette de *risotto* aux champignons en remplaçant les champignons par des carottes.

Supposons que, dans cette recette, les champignons soient ajoutés deux minutes avant la fin de cuisson du riz et que, selon les connaissances du domaine, les carottes doivent cuire 25 minutes tandis que le riz doit cuire 18 minutes. Une bonne adaptation devra donc non seulement allonger la cuisson des légumes, mais également réordonner les actions de la recette adaptée de façon à la rendre utilisable.

3 Fondements

Cette section présente quelques définitions et quelques résultats qui seront utilisés dans la suite de l’article.

3.1 Adaptation de cas

Dans cet article, *Source*, *Cible* et *CD* dénotent respectivement le cas à adapter, le cas cible et les connaissances du domaine. *Source* and *Cible* sont tenus d’être cohérent avec *CD*.¹ Étant donné *Source* et *Cible*, l’adaptation a pour but de construire un nouveau cas, *CasAdapté*. Ce cas est construit par addition de certaines informations au cas cible (intuitivement, *Cible* spécifie seulement la « partie problème » de la requête) qui doivent être cohérentes avec *CD*.

Il est supposé qu’une étape d’appariement précède le processus d’adaptation lui-même, ce qui fournit certains liens entre *Source* et *Cible*, représentés par une substitution σ . σ associe certains descripteurs de *Source* à certains descripteurs de *Cible*. À titre d’exemple, dans le système TAAABLE, l’appariement est effectué durant la remémoration [4]. Dans la suite, cette étape de prétraitement de l’adaptation est considérée comme donnée. Ainsi, σ est une entrée du processus d’adaptation décrit dans la section 4.

3.2 Révision de croyances et adaptation fondée sur la révision

3.2.1 Révision de croyance.

Dans un formalisme de représentation donné, un opérateur de révision $\dot{+}$ associe à deux bases de connaissances ψ et μ une base de connaissances $\psi \dot{+} \mu$, la révision de ψ par μ . Intuitivement, $\psi \dot{+} \mu$ est obtenu en faisant un changement minimal de ψ en ψ' , de sorte que la conjonction de ψ' et μ , $\psi' \wedge \mu$, est cohérent. $\psi \dot{+} \mu$ est alors la conjonction. La notion de changement minimal pouvant être modélisée de différentes manières, il existe divers opérateurs de révisions. Cependant, certains postulats ont été proposés pour un tel opérateur, tel que les postulats AGM [1]. Ces postulats ont été appliqués à la logique propositionnelle [13] et profondément étudiés dans ce formalisme. En particulier, étant donné une distance dist sur l’ensemble d’interprétation \mathcal{U} , un opérateur $\dot{+}_{\text{dist}}$ peut être uniquement défini (à l’équivalence logique près) comme suit : l’ensemble des modèles de $\psi \dot{+}_{\text{dist}} \mu$ est l’ensemble des modèles de μ qui ont une distance minimale à l’ensemble des modèles de ψ .

1. Si un cas *Source* de la base de cas est incohérent avec les connaissances du domaine, un processus de la maintenance de la cohérence doit être lancé pour restaurer la cohérence. Si une requête du système de RàPC est incohérente avec les connaissances du domaine, elle doit soit être rejetée (par exemple, une requête comme « Je veux une recette avec des pommes mais sans fruit » est rejetée par TAAABLE puisque les connaissances du domaine impliquent que les pommes sont des fruits), soit entraîner une modification du *CD*.

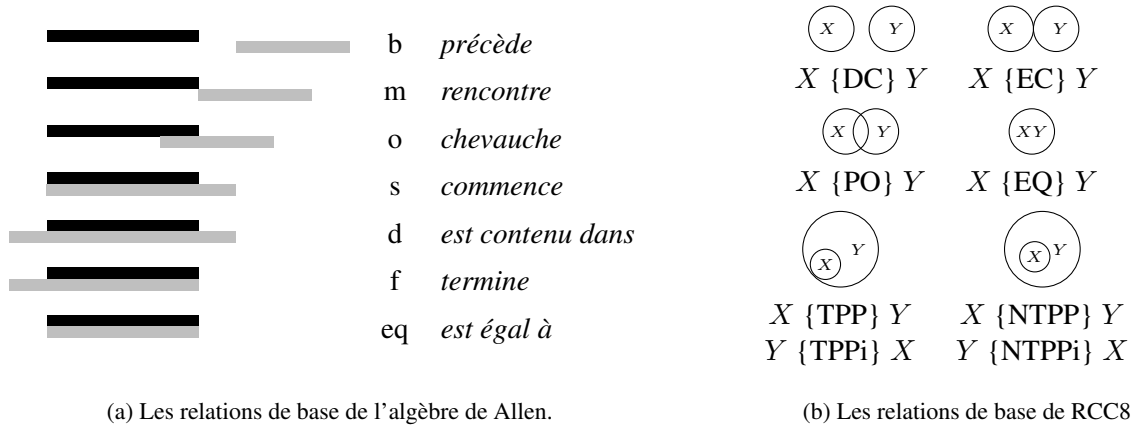


FIGURE 2: Deux algèbres qualitatives courantes.

3.2.2 Adaptation fondée sur la révision.

Étant donné un opérateur de révision $\dot{+}$, la $\dot{+}$ -adaptation consiste simplement à utiliser cet opérateur de révision pour effectuer l'adaptation, prenant en compte le domaine de connaissances :

$$\text{CasAdapté} = (\text{CD} \wedge \text{Source}) \dot{+} (\text{CD} \wedge \text{Cible}) \quad (1)$$

L'intuition derrière l'adaptation à partir de révision est de réduire l'adaptation en une réparation des incohérences. Ceci a été étudié en logique propositionnelle [17] et, plus généralement, dans les espaces métriques [5]. Le même principe a aussi été appliqué à l'adaptation dans la logique de descriptions expressive [6]. Cet article l'applique, avec quelques différences, aux réseaux de contraintes qualitatives.

3.3 Représentation qualitative de connaissances spatiales et temporelles

3.3.1 Définitions.

Une algèbre qualitative est une algèbre de relations qui définit un ensemble \mathfrak{B} de relations binaires applicables entre deux variables, représentant généralement des points, des intervalles ou des régions. L'algèbre des intervalles de Allen [2], par exemple, introduit 13 relations de base entre intervalles, correspondant aux 13 arrangements possibles des bornes inférieures et supérieures de deux intervalles. 7 relations sont illustrées dans la figure 2a. Les 6 autres sont l'inverse des 6 premières (eq est symétrique).

INDU [25] étend l'ensemble des relations de Allen en les combinant avec des relations sur la durée des intervalles. Pour 7 relations de Allen, il y a seulement une relation possible de durée (p.ex. $i \{d\} j$ implique que la durée de i est plus courte que la durée de j). Pour les 6 autres, les trois relations de durées $<$, $=$ et $>$ sont possibles. Cela donne un total de 25 relations de base. Elles sont notées r^s , où r est une relation de Allen et s est une relation de durée. La famille des algèbres RCC [26] comprend des algèbres spatiales bien connues. La plus usuelle, RCC8, introduit 8 relations entre régions, représentées dans la figure 2b.

Les connaissances qualitatives peuvent être représentées comme des réseaux de contraintes qualitatives (RCQ). Un RCQ est une paire (V, C) , où V est un ensemble de variables, et C est un ensemble de contraintes de la forme $V_i C_{ij} V_j$, avec $V_i, V_j \in V$, et C_{ij} un ensemble de relations basiques définies par l'algèbre (C_{ij} est une relation qui est une disjonction des relations de base, c.-à.-d. que $i \{r_1, r_2\} j$ signifie que i est lié à j par la relation r_1 ou bien par la relation r_2).

Dans *INDU*, les raccourcis de notation $r^?$ et $?^s$ représentent respectivement le produit cartésien de r et de toutes les relations de durées possibles, et le produit de s et de toutes les relations de Allen possibles.

(p.ex., $\{o, d\}^? = \{o^<, o^=, o^>, d^<\}$).

Un scénario est un RCQ $\mathcal{S} = (V_{\mathcal{S}}, C_{\mathcal{S}})$ tel que, pour chaque $V_i, V_j \in V_{\mathcal{S}}$, il existe une contrainte $V_i \{r\} V_j \in C_{\mathcal{S}}$. \mathcal{S} satisfait le RCQ $\mathcal{N} = (V_{\mathcal{N}}, C_{\mathcal{N}})$ si \mathcal{S} et \mathcal{N} ont les mêmes ensembles de variables et si chaque contrainte dans \mathcal{S} est un sous-ensemble de la contrainte correspondante dans \mathcal{N} . Un scénario est cohérent si

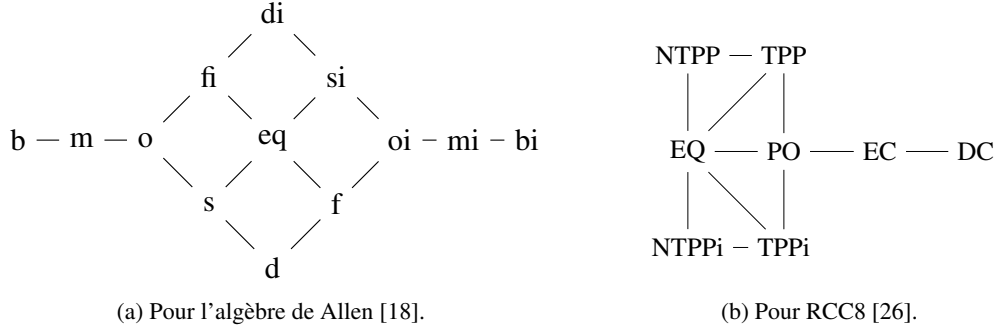


FIGURE 3: Les graphes de voisinage de relations de deux algèbres qualitatives courantes.

une valuation peut être fournie pour les variables de telle sorte que toutes les contraintes soient respectées ; et, par extension, un RCQ est cohérent s'il a un scénario cohérent. Deux RCQ sont dits équivalents si tout scénario du premier est un scénario du second et vice-versa.

3.3.2 Révision de RCQ.

Un RCQ est une base de connaissance et, ainsi, le problème de la révision d'un RCQ ψ par un RCQ μ peut être traité. Dans [7], un opérateur de révision sur les RCQ est défini,² suivant l'idée d'un opérateur $\dot{+}_{\text{dist}}$ (cf. section 3.2), où une interprétation est un scénario, un modèle d'un RCQ est un scénario qui le satisfait, et une distance dist entre scénarios/interprétations est définie comme suit.

Premièrement, une distance d entre les relations de base de l'algèbre considérée est définie. Formellement, un graphe connexe non dirigé, dont les nœuds sont les relations de l'algèbre, est donné, et $d(r, s)$ est la longueur du plus petit chemin entre r et s dans ce graphe. Ce graphe, nommé graphe de voisinage, n'est pas arbitraire : il représente la proximité entre relations. Par exemple, b et m sont proches ($d(b, m) = 1$) puisqu'ils expriment des conditions similaires sur les bornes des intervalles qui sont comparés (pour la borne inférieure : $=$ pour les deux ; pour la borne supérieure : $<$ pour b et $=$ pour m). La figure 3 présente de tels graphes, tels que proposé par [18] pour l'algèbre de Allen et par [26] pour RCC8, en s'appuyant sur un principe de changement minimal. d permet de définir dist , une distance entre deux scénarios $\mathcal{S} = (V, C_{\mathcal{S}})$ et $\mathcal{T} = (V, C_{\mathcal{T}})$ basée sur le même ensemble de variables V , que :

$$\text{dist}(\mathcal{S}, \mathcal{T}) = \sum_{V_i, V_j \in V, i \neq j} d(r_{\mathcal{S}}(V_i, V_j), r_{\mathcal{T}}(V_i, V_j)) \quad (2)$$

où $r_{\mathcal{S}}(V_i, V_j)$ est la relation r telle que $V_i \{r\} V_j \in C_{\mathcal{S}}$.

Étant donné deux RCQ ψ et μ , la révision de ψ par μ donne l'ensemble R des scénarios satisfaisant μ qui sont les plus proches à l'ensemble des scénarios satisfaisant ψ .³

4 Formalisation

4.1 Représentation du problème d'adaptation

4.1.1 RCQ paramétré.

Il est tenu pour acquis que les variables du RCQ considéré peuvent être paramétrées par les éléments de l'ensemble \mathcal{P} donné. Un paramètre $p \in \mathcal{P}$ est soit un *paramètre concret*, $p \in \mathcal{CP}$, ou un *paramètre abstrait*, $p \in \mathcal{AP}$: $\mathcal{P} = \mathcal{CP} \cup \mathcal{AP}$, $\mathcal{CP} \cap \mathcal{AP} = \emptyset$. Un paramètre concret dénote un concept du domaine

2. Techniquement, les auteurs de [7] définissent un opérateur de fusion prenant un RCQ coercitif en paramètre. Un opérateur de révision utilisant cet opérateur de fusion peut être défini.

3. Cela diffère légèrement de la définition de la révision donnée en section 3.2 où $\psi \dot{+} \mu$ est une base de connaissances, et non un ensemble de modèles. Ceci est dû au fait qu'il peut ne pas y avoir de RCQ ayant R comme ensemble de scénarios le satisfaisant.

d'application, par exemple champignons $\in \mathcal{CP}$ pour l'exemple culinaire. Dans cet exemple, l'intervalle formel cuire(champignons) représente l'intervalle temporel correspond à la cuisson des champignons. Les connaissances du domaine constituent un RCQ $CD = (V_{CD}, C_{CD})$ correspondant à un ensemble de contraintes, par exemple :

$$C_{CD} = \left\{ \begin{array}{ll} \text{cuire}(\text{riz}) \stackrel{?}{=} 18_min & (\text{le riz doit cuire pendant 18 min}) \\ \text{cuire}(x) \{m\}^? \text{cuites}(x) & (\text{quand l'action de cuire } x \text{ est terminée, } x \text{ est cuit}) \\ 18_min \stackrel{?}{<} 25_min & (18 \text{ min sont plus courtes que 25 min}) \end{array} \right\} \quad (3)$$

où riz $\in \mathcal{CP}$ et $x \in \mathcal{AP}$. Chaque intervalle correspond à la réification d'une action, d'un état ou d'une durée. Un paramètre abstrait doit être compris comme une quantification universelle sur les paramètres concrets ; par exemple cuire(x) {m}[?] cuites(x) implique cuire(champignons) {m}[?] cuites(champignons).

Soit \mathcal{N}_1 et \mathcal{N}_2 deux RCQ. Leur conjonction $\mathcal{N}_1 \wedge \mathcal{N}_2$ est le RCQ $\mathcal{N} = (V, C)$ tel que $V = V_1 \cup V_2$ et que C renferme les contraintes de C_1 , les contraintes de C_2 , et les contraintes qui sont déduites par l'instanciation des paramètres abstraits par les paramètres concrets apparaissant dans \mathcal{N}_1 et \mathcal{N}_2 . Par exemple, si $\mathcal{N}_1 = C_{CD}$ défini par l'équation (3) et $\mathcal{N}_2 = (\{\text{cuire}(\text{tomates}), \text{cuites}(\text{tomates})\}, \emptyset)$, alors $\mathcal{N}_1 \wedge \mathcal{N}_2 = (V, C)$ avec $C = C_{CD} \cup \{\text{cuire}(\text{tomates}) \{m\}^? \text{cuites}(\text{tomates})\}$.

4.1.2 Substitutions.

La *substitution atomique* $\sigma = p \rightsquigarrow q$, où $p, q \in \mathcal{P}$, est la fonction de \mathcal{P} dans \mathcal{P} définie par $\sigma(a) = \begin{cases} q & \text{si } a = p \\ a & \text{sinon} \end{cases}$. Une *substitution* est une composition $\sigma_1 ; \dots ; \sigma_n$ de substitutions atomiques σ_i .⁴

Soit $\sigma = p \rightsquigarrow q$ une substitution atomique. σ est *concrète* si $p, q \in \mathcal{CP}$. σ est une *abstraction atomique* si $p \in \mathcal{CP}$ et $q \in \mathcal{AP}$. σ est un *raffinement atomique* si $p \in \mathcal{AP}$ et $q \in \mathcal{CP}$. Une *substitution concrète* (resp., une abstraction, un raffinement) est une composition de substitutions atomiques concrètes (resp., d'abstractions atomiques, de raffinements atomiques). Toute substitution concrète σ peut s'écrire $\sigma = \alpha ; \varrho$ où α est une abstraction et ϱ est un raffinement, comme illustré par cette équation :

$$\text{champignons} \rightsquigarrow \text{carottes} = \text{champignons} \rightsquigarrow x ; x \rightsquigarrow \text{carottes}$$

où champignons, carottes $\in \mathcal{CP}$ et $x \in \mathcal{AP}$. Ceci peut être démontré comme suit. Premièrement, σ peut s'écrire $p_1 \rightsquigarrow q_1 ; \dots ; p_n \rightsquigarrow q_n$ avec $p_i, q_i \in \mathcal{CP}$ et $p_i \neq p_j$ si $i \neq j$.⁵ Soit x_1, \dots, x_n n paramètres abstraits, soit $\alpha_i = p_i \rightsquigarrow x_i$, soit $\varrho_i = x_i \rightsquigarrow q_i$, soit $\alpha = \alpha_1 ; \dots ; \alpha_n$, et soit $\varrho = \varrho_1 ; \dots ; \varrho_n$. α est une abstraction, ϱ est un raffinement et $\sigma = \alpha ; \varrho$.

Soit σ une substitution. σ est étendue aux variables qualitatives en l'appliquant à leurs paramètres. Par exemple, si $\sigma = \text{champignons} \rightsquigarrow \text{carottes}$ alors $\sigma(\text{cuire}(\text{champignons})) = \text{cuire}(\text{carottes})$. Ensuite, σ est étendue à une contrainte $c = (V_i \ C_{ij} \ V_j)$ par $\sigma(c) = (\sigma(V_i) \ C_{ij} \ \sigma(V_j))$. Finalement, σ est étendue à un RCQ en l'appliquant à ses variables et contraintes : $\sigma((V, C)) = (\sigma(V), \sigma(C))$ où $\sigma(V) = \{\sigma(V_i) \mid V_i \in V\}$ et $\sigma(C) = \{\sigma(c) \mid c \in C\}$.

4.1.3 Problème d'adaptation.

Un problème d'adaptation est un tuple (Source, Cible, CD, σ). Source et Cible sont la représentation des cas source et cible par des RCQ dotés de variables concrètes (c'est-à-dire non paramétrées par quelque paramètre abstrait). CD est un RCQ représentant les connaissances du domaine. $\sigma = p_1 \rightsquigarrow q_1 ; \dots ; p_n \rightsquigarrow q_n$ est une substitution concrète telle que chaque p_i (resp., q_i) paramètre une variable de Source (resp., Cible). $CD \wedge \text{Source}$ et $CD \wedge \text{Cible}$ sont considérés comme cohérents (cf. section 3.1). Le but de l'adaptation est de construire un RCQ CasAdapté cohérent qui implique $CD \wedge \text{Cible}$, dont les variables qualitatives sont obtenues en appliquant σ sur les variables qualitatives de Source, et qui est obtenu par un changement minimal de $CD \wedge \text{Source}$.

4. La composition de σ et de σ' , notée $\sigma ; \sigma'$, est la fonction qui associe à $p \in \mathcal{P}$, $\sigma ; \sigma'(p) = \sigma'(\sigma(p)) \in \mathcal{P}$.

5. Ce qui peut être démontré par induction grâce aux lemmes suivants : (1) si $p \neq q$ alors $p \rightsquigarrow q ; p \rightsquigarrow q' = p \rightsquigarrow q ; p \rightsquigarrow q'$, (2) $p \rightsquigarrow q ; q \rightsquigarrow r = p \rightsquigarrow r$, et (3) si $p \neq p', q \neq p'$ et $q' \neq p$, alors $p \rightsquigarrow q ; p' \rightsquigarrow q' = p' \rightsquigarrow q' ; p \rightsquigarrow q$.

4.2 Principes de l'adaptation fondée sur la révision d'un RCQ

Une idée initiale pour effectuer l'adaptation, étant donné un tuple $(Source, Cible, CD, \sigma)$, est d'appliquer σ à $Source$, obtenant ainsi un RCQ $CD \wedge \sigma(Source)$ qui pourrait être incohérent, puis de rétablir la cohérence. Bien que cette idée fournisse une bonne intuition de l'adaptation fondée sur la révision d'un RCQ, elle n'est pas cohérente avec le principe de la non pertinente de la syntaxe (qui est généralement pris en compte, par exemple pour la révision des croyances [13]). En effet, toutes les bases de connaissances incohérentes (par exemple, deux RCQ incohérents) sont équivalentes : l'ensemble de leurs modèles est vide. Donc, d'un point de vue sémantique (par opposition à un point de vue syntaxique), réparer une base de connaissances incohérentes n'a aucun sens. La révision, de son côté, a pour but de modifier une base de connaissances *cohérente* à l'aide d'une autre base de connaissances *cohérente*, mais dont la conjonction pourrait être incohérente. C'est l'une des raisons pour laquelle nous ne suivons pas directement cette idée initiale. Il existe une autre raison, plus pragmatique : la révision des RCQ rend possible la réutilisation du travail de [7].

L'adaptation fondée sur la révision consiste en premier lieu à décomposer σ en une abstraction α et en un raffinement ϱ : $\sigma = \alpha ; \varrho$ (cf. section précédente). Puis, α est appliquée à $Source$: un RCQ $CD \wedge \alpha(Source)$ est construit, et est nécessairement cohérent puisque $CD \wedge Source$ est cohérent et que chaque contrainte $CD \wedge \alpha(Source)$ correspond à une contrainte de $CD \wedge Source$. En d'autres termes, $CD \wedge Source$ est cohérent et est plus ou également contraint que $CD \wedge \alpha(Source)$, donc $CD \wedge \alpha(Source)$ est cohérent.

La troisième étape implique la révision. L'idée est d'effectuer la révision de ψ par μ où $\psi = CD \wedge \alpha(Source)$ et $\mu = CD \wedge Cible \wedge \mathcal{N}_\varrho$, où \mathcal{N}_ϱ représente l'affirmation suivante : « Chaque variable qualitative V_i de $\alpha(Source)$ est contrainte de la même manière que son raffinement $\varrho(V_i)$. » À cette fin, la relation eq pour l'égalité est utilisée⁶ : $V_i eq \varrho(V_i)$. Donc, $\mathcal{N}_\varrho = (V_\varrho, C_\varrho)$ où

$$V_\varrho = \alpha(V) \cup \sigma(V) \quad C_\varrho = \{V_i eq \varrho(V_i) \mid V_i \in \alpha(V)\}$$

μ est cohérent puisque $CD \wedge Cible$ l'est et que chaque contrainte $V_i eq \varrho(V_i)$ de \mathcal{N}_ϱ soit est une tautologie (lorsque V_i ne contient aucun paramètre abstrait raffiné par ϱ), ou bien lie un variable V_i qui n'apparaît pas dans $CD \wedge Cible$ à $\varrho(V_i)$.

Finalement, $\psi \dot{+} \mu$ donne un ensemble de scénarios et $CasAdapté$ est choisi parmi ceux-ci.

5 Algorithme et mise en œuvre

Dans cette section, l'algorithme exécutant la solution décrite dans la section précédente est détaillé.

5.1 Entrée et sortie.

L'algorithme de révision prend en entrée $\psi = CD \wedge \alpha(Source)$, $\mu = CD \wedge Cible \wedge C_\varrho$, ainsi que la relation du graphe de voisinage et la table de transitivité pour l'algèbre utilisée. Le graphe de voisinage permet de définir une distance d entre les relations et la table de transitivité définit une fonction de compositions de relations $\circ : \mathfrak{B} \times \mathfrak{B} \rightarrow 2^{\mathfrak{B}}$, par exemple, $m \circ m_i = \{eq, f, fi\}$ dans l'algèbre de Allen.

L'algorithme de révision retourne un ensemble de scénarios de μ et leur distance à ψ .

5.2 Algorithme.

Premièrement, il est nécessaire de faire en sorte que toutes les variables dans l'un des RCQ soient présentes dans l'autre RCQ. Tout couple de variables qui n'a pas de relation associée reçoit la relation \mathfrak{B} – la relation non spécifiée.

L'algorithme doit ensuite générer tous les scénarios de μ et de ψ et mesurer leur distance paire par paire. La quantité de scénarios pour un RCQ donné est de l'ordre de $O\left(|\mathfrak{B}|^{\frac{|V| \cdot (|V|-1)}{2}}\right)$. Pour chaque paire de scénarios, la distance est calculée en utilisant l'équation (2). La distance entre un scénario \mathcal{S} de μ et le RCQ ψ est la plus petite distance entre \mathcal{S} et n'importe quel scénario de ψ . La distance entre le RCQ μ et ψ est la plus petite

6. eq est $eq^=$ pour \mathcal{LNU} et EQ pour $RCC8$.

distance entre un scénario de μ et le RCQ ψ . Une fois que tous les scénarios de μ et de ψ ont été comparés paire par paire, la distance entre μ et ψ est connue et les scénarios de μ correspondant à cette distance sont retournés.

Seuls les scénarios cohérents doivent être considérés. La chemin-cohérence d'un scénario, comme défini dans [20], est une condition nécessaire et suffisante pour la cohérence.⁷ Cette condition est vérifiée en temps $O(|V|^3)$ si, pour chaque $V_i, V_j, V_k \in V$, $r(V_i, V_k) \in r(V_i, V_j) \circ r(V_j, V_k)$. Tous les scénarios incohérents sont écartés.

5.3 Optimisations.

A cause de la complexité, il est essentiel de limiter l'espace de recherche. Considérant que le minimum des sommes n'est jamais inférieur à la somme des minimums, une borne inférieure sur la distance entre deux RCQ peut être obtenue en temps $O(|V|^2 \cdot |\mathcal{B}|^2)$ en calculant la distance minimale entre relations paire par paire pour chaque contrainte et en additionnant ces distances. Empiriquement, il apparaît que la distance effective est habituellement plus proche de cette borne inférieure que de la borne supérieure, qui est une fonction de la longueur du plus long chemin dans le graphe de voisinage.

Par conséquent, il est souvent profitable de fixer une borne supérieure initiale sur la distance entre ψ et μ qui est égale à la borne inférieure, et de chercher itérativement. Cette recherche peut être encore optimisée en calculant la borne inférieure sur la distance entre un scénario \mathcal{S} de μ et ψ , qui peut être donné en temps $O(|V|^2)$. Cette borne permet d'écarter directement certains scénarios de μ et ainsi d'éviter d'avoir à générer tous les scénarios de ψ à nouveau. Bien sûr, dès qu'un scénario de μ est trouvé à une distance acceptable d'un scénario de ψ , la recherche itérative fait en sorte qu'il n'est pas nécessaire d'examiner d'autre scénario de ψ .

Une autre optimisation utile dans les problèmes de taille plus grande que quelques variables est le calcul de la fermeture algébrique du RCQ, qui est obtenue en forçant la chemin-cohérence. C'est-à-dire que, pour chaque $V_i, V_j, V_k \in V$, C_{ik} est remplacé par $C'_{ik} = C_{ik} \cap (C_{ij} \circ C_{jk})$ où \circ est étendu sur $2^{\mathcal{B}} \times 2^{\mathcal{B}} \rightarrow 2^{\mathcal{B}}$ par $R \circ S = \bigcup_{r \in R, s \in S} r \circ s$. Ceci est répété jusqu'à atteinte de la stabilité, c'est-à-dire jusqu'à ce qu'aucune relation ne soit changée après avoir considéré tous les 3-tuples de variables.

6 Application sur les exemples

Cette section revient sur les deux exemples présentés en section 2. Tout d'abord, l'exemple agronomique pris dans sa forme simple (seul le miscanthus est cultivé) pour illustrer l'algorithme. Ensuite, nous discutons de la formalisation et des résultats obtenus sur l'exemple agronomique complet et sur l'exemple culinaire.

6.1 Un problème agronomique simplifié

Soit un exploitant agricole qui cultive une parcelle de maïs adjacente à une rivière. Dans la suite, nous distinguons deux zones – dont l'usage agricole est différent – la rivière elle-même, dénotée `lit_mineur`, et la zone inondable, dénotée `lit_majeur`. Le `lit_mineur` est une partie propre intérieure du `lit_majeur` ce qui peut s'exprimer de la façon suivante en RCC8 : `lit_mineur {NTPP} lit_majeur`. Le fait que la parcelle de maïs est adjacente à la rivière est représenté par `parcelle(maïs) {EC} lit_mineur`.

Soit un problème où un agriculteur veut cultiver du miscanthus dans une configuration similaire, conduisant à la remémoration du cas décrit précédemment. Une substitution doit être appliquée : $\sigma = \text{maïs} \rightsquigarrow \text{miscanthus} = \text{maïs} \rightsquigarrow x ; x \rightsquigarrow \text{miscanthus}$. Une connaissance importante concernant le miscanthus est qu'il ne doit pas être cultivé dans une zone inondable, ce qui peut être exprimé de la façon suivante : `parcelle(miscanthus) {DC, EC} lit_majeur`.

Dans cet exemple, ψ contient les contraintes :

$$\begin{aligned} C_{\text{CD}} &= \{\text{parcelle(miscanthus) \{DC, EC\} lit_majeur}\} \\ C_{\alpha(\text{Source})} &= \left\{ \begin{array}{l} \text{lit_mineur\{NTPP\} lit_majeur} \\ \text{parcelle}(x) \{\text{EC}\} \text{lit_mineur} \end{array} \right\} \end{aligned}$$

7. La même chose n'est pas vraie pour les RCQ en général, comme démontré dans [2].

et μ contient les contraintes :

$$\begin{aligned} C_{CD} &= \{\text{parcelle}(\text{miscanthus}) \{DC, EC\} \text{lit_majeur}\} \\ C_{Cible} &= \{\text{lit_mineur} \{NTPP\} \text{lit_majeur}\} \\ C_\varrho &= \{\text{parcelle}(x) \{EQ\} \text{parcelle}(\text{miscanthus})\} \end{aligned}$$

La première étape de l’algorithme est d’ajouter les variables et les contraintes manquantes. Dans cet exemple les quatre variables sont présentes dans les deux RCQ, mais il manque des relations, par exemple entre les variables $\text{parcelle}(\text{miscanthus})$ et lit_mineur . On ajoute donc à la fois à μ et à ψ la contrainte : $\text{parcelle}(\text{miscanthus}) \{DC, EC, PO, TPP, NTPP, TPPI, NTPPI, EQ\} \text{lit_mineur}$.

Cette manipulation peut conduire à complexifier les RCQ, et c’est une des raisons pour lesquelles il est intéressant de calculer leur clôture algébrique. Dans cet exemple le nombre de scénarios potentiels est réduit de 1024 à 16 pour ψ , et de 1024 à 4 pour μ .

Dans une deuxième étape, on calcule la distance minimale entre ψ et μ . Ici, ce minimum vaut 3, qui est la distance entre ψ et μ . À cette distance, on trouve un seul scénario \mathcal{T} de $\mu : \psi \dot{+} \mu = \{\mathcal{T}\} = \{(V_{\mathcal{T}}, C_{\mathcal{T}})\}$ avec

$$C_{\mathcal{T}} = \left\{ \begin{array}{l} \text{lit_mineur}\{NTPP\} \text{lit_majeur} \\ \text{lit_mineur}\{DC\} \text{parcelle}(x) \\ \text{lit_mineur}\{DC\} \text{parcelle}(\text{miscanthus}) \\ \text{lit_majeur}\{EC\} \text{parcelle}(x) \\ \text{lit_majeur}\{EC\} \text{parcelle}(\text{miscanthus}) \\ \text{parcelle}(x) \{EQ\} \text{parcelle}(\text{miscanthus}) \end{array} \right\}$$

La valeur de la distance est obtenue par la somme des valeurs des remplacements suivants : EC devient DC entre $\text{parcelle}(x)$ et lit_mineur ($d=1$), $\{TPP, NTPP, PO\}$ devient EC entre lit_majeur et $\text{parcelle}(x)$ ($d=1$) et $\{DC, EC, NTPPI, PO\}$ devient EQ entre $\text{parcelle}(x)$ et $\text{parcelle}(\text{miscanthus})$ ($d=1$).

Dans ce scénario, la région $\text{parcelle}(x)$ a été réduite de sorte à ne pas recouvrir le lit_majeur quand elle a été assimilée à $\text{parcelle}(\text{miscanthus})$. Cela correspond à la configuration présentée figure 1b. On peut voir que la modification est en effet minimale, puisque la parcelle devient extérieurement connectée à la zone inondable, maximisant ainsi la surface utilisée par la culture de miscanthus. À l’inverse, un résultat incluant $\text{lit_majeur} \{DC\} \text{parcelle}(\text{miscanthus})$ serait cohérent avec les connaissances du domaine mais ne serait pas une modification minimale de ψ . Ainsi l’algorithme produit la meilleure adaptation.

6.2 Un problème agronomique complet

Pour obtenir une adaptation plus réaliste (où tout le territoire est utilisé) telle que décrite dans la section 2.1, la parcelle est scindée en deux parties $\text{parcelle1}(x)$ et $\text{parcelle2}(y)$ avec $\sigma = x \rightsquigarrow \text{miscanthus} ; y \rightsquigarrow \text{maïs}$. Dans ψ , la seule information disponible sur ces deux parcelles est qu’elles sont connectées extérieurement au lit_mineur .

L’algorithme de révision produit 5 scénarios. Tous résolvent les contraintes de sorte à maximiser la taille de la parcelle de miscanthus, mais la part allouée au maïs varie. La figure 1c présente la configuration obtenue pour un des scénarios. Les autres sont similaires.

6.3 Un problème culinaire

La plupart des informations temporelles présentes dans les recettes peuvent être représentées avec le modèle *INDU* en réifiant les actions, les états des ingrédients et les durées sous la forme d’intervalles. Par exemple, les énoncés suivants peuvent être insérés dans les connaissances du domaine : $\text{cuire}(\text{carottes}) \{m\}^?$ $\text{cuites}(\text{carottes})$ et $\text{cuire}(\text{carottes}) \stackrel{?}{=} 25_min$, avec également, par exemple, $18_min \stackrel{?}{<} 25_min$.

Dans un problème simple comme cela, on peut combiner directement les contraintes et ainsi limiter le nombre de variables. Ainsi le problème décrit en section 2.2 peut être ramené à 4 variables en remplaçant les

intervalles de durée par des relations de durée entre les actions correspondantes. Dans cette représentation, ψ contient :

$$\begin{aligned} C_{CD} &= \left\{ \begin{array}{l} \text{cuire(riz)} ?^{<} \text{cuire(carottes)} \\ \text{cuire(riz)} \{m\}^? \text{servir} \\ \text{cuire(carottes)} \{m\}^? \text{servir} \end{array} \right\} \\ C_{\alpha(\text{Source})} &= \{\text{cuire}(x)\{f^{<}\}\text{servir}\} \end{aligned}$$

Dans TAAABLE, il n'y a pas d'adaptation stable des contraintes de Cible ($C_{\text{Cible}} = \emptyset$), μ contient donc simplement les contraintes suivantes :

$$\begin{aligned} C_{CD} &= \left\{ \begin{array}{l} \text{cuire(riz)} ?^{<} \text{cuire(carottes)} \\ \text{cuire(riz)} \{m\}^? \text{servir} \\ \text{cuire(carottes)} \{m\}^? \text{servir} \end{array} \right\} \\ C_g &= \{\text{cuire}(x) ?^= \text{cuire(carottes)}\} \end{aligned}$$

L'algorithme de révision renvoie deux scénarios qui ne se distinguent que par la relation de durée entre *servir* et les autres actions, puisque cette relation est peu importante selon les connaissances du domaine. Le scénario $\mathcal{T} = (V_{\mathcal{T}}, C_{\mathcal{T}})$ est tel que $C_{\mathcal{T}}$ vaut :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{cuire}(x)\{m^{>}\}\text{servir}, & \text{cuire}(x)\{eq^{=}\}\text{cuire(carottes)} \\ \text{cuire(carottes)}\{m^{>}\}\text{servir}, & \text{cuire}(x)\{fi^{>}\}\text{cuire(riz)} \\ \text{cuire(riz)}\{m^{>}\}\text{servir}, & \text{cuire(carottes)}\{fi^{>}\}\text{cuire(riz)} \end{array} \right\}$$

Dans les deux scénarios, l'allongement de la cuisson des légumes est associé à l'inversion de la relation entre les légumes et le riz, i.e. $f^{<}$ devient $fi^{>}$, ce qui correspond à l'inversion attendue de l'ordre entre le démarrage des deux actions. Ainsi l'adaptation a réussi.

7 Travaux connexes

Plusieurs travaux récents combinent le RÀPC et le raisonnement spatial qualitatif, par exemple pour améliorer des services web d'informations spatiales [23] ou pour prédire des lieux d'apparition d'événements en territoires hostiles [16]. D'autres travaux plus anciens avaient déjà souligné l'intérêt du RÀPC pour l'analyse de données géographiques, par exemple pour la classification des sols [11]. Nous mêmes avons développé un système de RÀPC pour aider des agronomes dans l'analyse et la comparaison d'enquêtes en exploitations [15]. Ce système utilisait des graphes conceptuels, dont les sommets et les arêtes sont étiquetés, pour représenter l'organisation spatiale de territoires agricoles. L'hypothèse était que des organisations similaires avaient des fonctionnements similaires. Les *cas spatio-fonctionnels* étaient implantés dans un système de logique de description et le raisonnement s'appuyait sur une combinaison de classification hiérarchique (au sens des logiques de description), de RÀPC et de raisonnement spatial qualitatif.

La représentation du temps a été plus largement étudiée pour le raisonnement à partir de cas. La plupart des travaux s'intéressent à l'analyse ou la prédiction de processus temporels (diagnostic de pannes ou de maladies à partir d'observations régulières ou d'événements successifs, par exemple). L'aspect temporel est pris en compte via l'enchaînement des événements ou éventuellement des dates relatives ou absolues [8, 19, 27]. Seuls les travaux décrits dans [12, 9], à notre connaissance, utilisent une représentation du temps à base d'intervalles et de relations de Allen. Dans [9], les cas sont représentés par des graphes temporels et la remémoration s'appuie sur un appariement de graphes. Dans [12], les cas sont indexés par des chroniques et des contraintes temporelles qui sont décrites par quelques relations de Allen. Notons également les travaux récents de S. Laborie et al., sur l'adaptation de documents multimédia, qui comprend à la fois des aspects spatiaux et des aspects temporels représentés au moyen des algèbres qualitatives [14].

La planification à partir de cas (PÀPC, voir par exemple [22]) est également un domaine qui traite d'aspects temporels. La différence principale entre la PÀPC et notre approche est que les connaissances manipulées sont de natures différentes : la PÀPC traite de la réalisation de buts et modélise des actions en fonction de leur applicabilité et de leurs effets. Notre approche en revanche s'applique à des procédures représentées par des

contraintes temporelles entre actions, et traite de ces contraintes et d'actions réifiées sous la forme d'intervalles de temps. En théorie ces approches pourraient être combinées mais elles ont des objectifs différents : la PÀPC classique se veut d'abord efficace et utilise des connaissances complètes de résolution de problème tandis que notre approche s'intéresse à la manipulation de connaissances incomplètes (par exemple les effets de chaque action d'une recette sont formalisés de façon incomplète).

8 Conclusion

Les algèbres qualitatives constituent un domaine important dans le champ de la représentation des connaissances. Elles sont notamment utilisées pour le raisonnement spatial et temporel. Cependant, elles ont encore peu été utilisées dans le cadre du raisonnement RÀPC.

Cette article propose une approche pour l'adaptation de cas représentés à l'aide d'une algèbre qualitative. Il présente deux exemples : un exemple utilisant de l'algèbre spatiale RCC8 appliquée dans le domaine agricole et un autre exemple utilisant de l'algèbre temporelle *INDU* appliquée dans le domaine culinaire. L'adaptation présentée dans cet article repose sur les principes de l'adaptation par révision, combinant celle-ci avec un appariement entre le cas source et le cas cible.

Un prototype pour l'adaptation de cas représentés à l'aide d'une algèbre qualitative a été mise en œuvre en Perl. Il a été appliqué aux exemples, mais nécessite un temps de calcul trop important. De nombreuses optimisations devront être faites pour permettre son intégration dans un système opérationnel comme TAAABLE. Plusieurs sont déjà prévues.

Premièrement, le programme peut être optimisé grâce à certaines caractéristiques du problème de révision qui ne sont pas prises en compte dans le prototype actuel :

- Le fait que le cas source représente souvent un épisode spécifique de résolution de problème qui conduit le RCQ *Source* à n'avoir que peu de scénarios.
- Le fait que la différence entre les RCQ est causée par σ , qui doit donc être considérée comme la source possible de toute incohérence.

Deuxièmement, une étude sur la conception d'un processus de « propagation des réparations » dans les RCQ est prévue. Celui-ci serait similaire à l'algorithme classique de propagation de contraintes dans les RCQ, qui est similaire au processus d'adaptation décrit dans [6].

Comme l'exemple agricole le montre, le RCQ peut apparaître dans la requête du système de RÀPC. Cela signifie que, pour une telle application, la comparaison des RCQ doit aussi se faire durant l'étape de recherche du cas source. Un travail en perspective serait d'étudier comment implanter un tel processus de recherche.

Références

- [1] C.E. Alchourrón, P. Gärdenfors, et D. Makinson. On the Logic of Theory Change : partial meet functions for contraction and revision. *Journal of Symbolic Logic*, 50 :510–530, 1985.
- [2] J.F. Allen. Maintaining knowledge about temporal intervals. *Communications of the ACM*, 26(11) :832–843, November 1983.
- [3] J.C. Clifton-Brown, P.F. Stampfl, et M.B. Jones. Miscanthus biomass production for energy in Europe and its potential contribution to decreasing fossil fuel carbon emissions. *Global Change Biology*, 10(4) :509–518, April 2004.
- [4] J. Cojan, V. Dufour-Lussier, E. Gaillard, J. Lieber, E. Nauer, et Y. Toussaint. Knowledge extraction for improving case retrieval and recipe adaptation. In *Computer Cooking Contest Workshop*, London, Royaume-Uni, September 2011.
- [5] J. Cojan et J. Lieber. Conservative Adaptation in Metric Spaces. In *Advances in Case-Based Reasoning – Proceedings of ECCBR 2008*, Lecture Notes in Computer Sciences 5239, pages 135–149. Springer, 2008.
- [6] J. Cojan et J. Lieber. An Algorithm for Adapting Cases Represented in *ALC*. In *22th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Barcelone Espagne, July 2011.

- [7] J.-F. Condotta, S. Kaci, et N. Schwind. A framework for merging qualitative constraints networks. In David Wilson et H. Chad Lane, editors, *FLAIRS Conference*, pages 586–591. AAAI Press, May 2008.
- [8] M. Dojat, N. Ramaux, et D. Fontaine. Scenario recognition for temporal reasoning in medical domains. *Artificial Intelligence in Medicine*, 14 :139–155, 1998.
- [9] M. Dørum Jære, A. Aamodt, et P. Skalle. Representing temporal knowledge for case-based prediction. In *Advances in Case-Based Reasoning, Proceedings of ECCBR 2002*, Lecture Notes in Computer Science 2416, pages 174–188. Springer, 2002.
- [10] J. Hillier, C. Whittaker, G. Dailey, M. Aylott, E. Casella, G.M. Richter, A. Riche, R. Murphy, G. Taylor, et P. Smith. Greenhouse gas emissions from four bioenergy crops in England and Wales : Integrating spatial estimates of yield and soil carbon balance in life cycle analyses. *Global Change Biology Bioenergy*, 1(4) :267–281, August 2009.
- [11] A. Holt et G.L. Benwell. Case-Based Reasoning and Spatial Analysis. *Journal of the Urban and Regional Information Systems Association*, 8 :27–36, 1996.
- [12] M. Jaczynski et B. Trousse. WWW assisted browsing by reusing past navigations of a group of users. In Barry Smyth et Pádraig Cunningham, editors, *Advances in Case-Based Reasoning*, Lecture Notes in Computer Science 1488, pages 160–171. Springer Berlin / Heidelberg, 1998.
- [13] H. Katsuno et A. Mendelzon. Propositional knowledge base revision and minimal change. *Artificial Intelligence*, 52(3) :263–294, 1991.
- [14] S. Laborie, J. Euzenat, et N. Layaïda. Semantic adaptation of multimedia documents. *Multimedia Tools and Applications*, 55 :379–398, 2011.
- [15] F. Le Ber, A. Napoli, J.-L. Metzger, et S. Lardon. Modeling and comparing farm maps using graphs and case-based reasoning. *Journal of Universal Computer Science*, 9(9) :1073–1095, September 2003.
- [16] H. Li, H. Muñoz-Avila, D. Bransen, C. Hogg, et R. Alonso. Spatial event prediction by combining value function approximation and case-based reasoning. In L. McGinty et D.C. Wilson, editors, *ICCBR 2009*, LNAI 5650, pages 465–478. Springer-Verlag, 2009.
- [17] J. Lieber. Application of the Revision Theory to Adaptation in Case-Based Reasoning : the Conservative Adaptation. In *Proceedings of the 7th International Conference on Case-Based Reasoning (ICCBR-07)*, Lecture Notes in Artificial Intelligence 4626, pages 239–253. Springer, Belfast, 2007.
- [18] G. Ligozat. On generalized interval calculi. In *Proceedings of the 9th National Conference of the American Association for Artificial Intelligence (AAAI)*, pages 234–240, Anaheim, CA, 1991. AAAI Press/MIT Press.
- [19] J. Ma et B. Knight. A Framework for Historical Case-Based Reasoning. In *Case-Based Reasoning Research and Development, Proceedings of ICCBR 2003*, Lecture Notes in Computer Science 2689, pages 246–260, 2003.
- [20] A. K. Mackworth. Consistency in networks of relations. *Artificial Intelligence*, 8(1) :99–118, 1977.
- [21] L. Martin, J. Wohlfahrt, F. Le Ber, et M. Benoît. L’insertion territoriale des cultures biomasses pérennes : le cas du miscanthus par dix agriculteurs de Côte d’Or. *L’Espace Géographique*, 2012. À paraître.
- [22] H. Munoz-Avila et M.T. Cox. Case-Based Plan Adaptation : An Analysis and Review. *Intelligent Systems, IEEE*, 23(4) :75–81, 2008.
- [23] T. Osman, D. Thakker, Y. Yang, et C. Claramunt. Semantic spatial web services with case-based reasoning. In *Web and Wireless Geographical Information Systems, Proceedings of the 6th International Symposium, W2GIS 2006*, Lecture Notes in Computer Science 4295, pages 247–258, Hong Kong, China, December 2006. Springer.
- [24] P.-L. Osty, F. Le Ber, et J. Lieber. Raisonnement à partir de cas et agronomie des territoires – constructions croisées. *Revue d’Anthropologie des Connaissances*, 2(2) :169–193, 2008.
- [25] A.K. Pujari, G. Vijaya Kumari, et A. Sattar. INDU : An interval & duration network. *Advanced Topics in Artificial Intelligence*, pages 291–303, 1999.

- [26] D.A. Randell, Z. Cui, et A.G. Cohn. A spatial logic based on regions and connection. In *Knowledge Representation*, pages 165–176, 1992.
- [27] M. Sánchez-Marré, U. Cortés, M. Martínez, J. Comas, et I. Rodríguez-Roda. An approach for temporal case-based reasoning : Episode-based reasoning. In *Case-Based Reasoning Research and Development, Proceedings of ICCBR 2005*, Lecture Notes in Computer Science 3620, pages 465–476, 2005.